

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ЗАВАД У КАНАЛАХ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ VDSL2+

В. Балашов, В. Орешков, Д. Стеля

*Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, вул. Кузнечна, 1, Одеса, 65029, Україна*

Відповідальний за рукопис: Д. О. Стеля (e-mail: [dima.stels12@gmail.com](mailto:dima.stels12@gmail.com)).

*(Подано 26 листопада 2021)*

Наведено результати дослідження інтерференційних завад у системах передавання (СП) за технологією VDSL2 у разі роботи по кабелях типу “вита пара”. Дослідження полягало у аналітичному моделюванні роботи VDSL2-систем із частотним планом В8-6 [998-М2х-В] через кабель UTP Cat.5e 4x0.5 із використанням традиційних ортогональних гармонійних сигналів (ОГС) й ортогональних гармонійних сигналів узагальненого класу (ОГС УК). Значення інтерференційних завад оцінювали у відносних величинах як процентне співвідношення ефективних значень “інтерференційна завада/сигнал”. У статті подано тривимірні графіки залежності розподілу по каналах значень інтерференційної завади у випадку зміни довжини лінії від 100 до 500 метрів. Розраховано оптимальні значення відліку початку інтегрування за критерієм мінімуму середньоарифметичного для всіх інформаційних каналів значення інтерференційної завади. Досліджено залежності розподілу інтерференційних завад по каналах СП VDSL2 із використанням традиційних ОГС та ОГС УК. Проаналізовано залежність інтерференційних завад у каналах СП VDSL2 від довжини лінії, типу ортогональних гармонійних сигналів і напряму передавання. Доведено ефективність застосування ортогональних гармонійних сигналів узагальненого класу порівняно із традиційними ОГС.

**Ключові слова:** *технологія VDSL2; інтерференція; система передавання; ортогональні сигнали; вита пара UTP Cat.5e 4x0.5.*

**УДК 621.395**

### 1. Вступ

Підвищення швидкості доступу є основним пріоритетом у стратегії розвитку широко-смугового доступу (ШД) операторів зв'язку. Один із варіантів його реалізації на сучасному етапі – заміна застарілих технологій передавання xDSL по телефонних дротах типу ТПП, таких як ADSL/ADSL2+, на технології передавання VDSL2 або G.fast [1]. Системи передавання (СП) VDSL2 забезпечують двостороннє передавання даних по телефонних кабелях зі швидкістю до 200 Мбіт/с у смузі частот до 30 МГц [2, 3]. Збільшення швидкості передавання порівняно з технологією ADSL2+ досягається за рахунок розширення використовуваної смуги частот і зменшення довжини абонентської лінії.

Модернізація мережі ШД в цьому випадку полягає у заміні варіанта побудови мережі FTTC+ ADSL2+ (вузол доступу встановлювали на телефонній станції) на варіант FTTC + VDSL2 (з винесенням вузла доступу в розподільну шафу). Іноді при цьому виникає необхідність (доцільність) заміни кабелю ТПП на кабель типу “вита пара”. Дослідження характеристик ШД для варіанта побудови мережі FTTC+ VDSL2 із застосуванням кабелів типу “кручена пара” актуальне. СП VDSL2, як і більшість систем СП ШД, також використовують метод передавання безліччю ортогональних сигналів-переносників (ОГС), (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Особливість цього дослідження – застосування ОГС узагальненого класу (ОГС УК) з оптимальною формою обвідної послання сигналу на тактовій інтервалі, що дозволяє зменшити вплив інтерференції порівняно з традиційними ОГС [4].

## 2. Опис досліджуваної моделі СП

Дослідження інтерференційних завад у СП мережі FTTC + VDSL2 із застосуванням кабелів UTP Cat.5e 4x0.5 здійснено за методикою, наведеною в [3, 5].

В аналітичній моделі СП VDSL2 використано такі параметри СП:

СП VDSL2 із частотним планом B8-6 [998-M2x-B] [2] (рис. 1);

- першого інформаційного каналу ( $m$ ) –  $mDS = 16$  (Down Stream (DS)),  $mUS = 218$  (Up Stream (US)) передавання – кабель кручена пара UTP Cat 5e з діаметром жил 0,5 мм;
- довжина лінії ( $l$ ) варіюється у межах – 100...500 м;
- лінійні сигнали – традиційні ОГС (П-подібної форми) й ОГС УК з оптимальною функцією (з косинусквадратичними фронтами) [4];
- основна частота (рознесення частот між каналами) –  $f_0 = 17,25$  кГц;
- кількість відліків інтервалу ортогональності ( $N$ ) – 2048;
- кількість відліків захисного інтервалу ( $L$ ) – 128;
- кількість інформаційних каналів ( $n$ ) downstream –  $nDS = 477$  (канали 16 ... 217 і 302 ... 492), upstream –  $nUS = 478$  (канали 218 ... 301 і 493 ... 695);
- номер першого інформаційного каналу ( $m$ ) –  $mDS = 16$  (Down Stream (DS)),  $mUS = 218$  (Up Stream (US)).

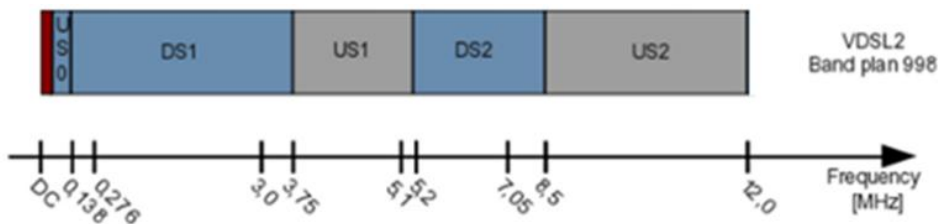


Рис. 1. Частотний план B8-6 [998-M2x-B]

На рис. 2 наведено структурні схеми  $l$ -го каналу СП із традиційними ОГС (а) і СП з ОГС УК (б). Традиційні СП ОГС для протидії інтерференції використовують захисний інтервал, тому тривалість тактового інтервалу  $T = \tau_0 + \tau_g$  традиційних СП ОГС визначається як сума тривалості інтервалу ортогональності  $\tau_0$  і захисного інтервалу  $\tau_g$  (рис. 3, а).

У СП з ОГС ОК, порівняно з традиційною СП ОГС, під час формування групового сигналу використовується додатковий опорний сигнал  $u(t - pT)$ , який дає змогу сформувати лінійний сигнал тривалістю  $T$  із косинусквадратичними фронтами (рис. 3, б). Сигнали ОГС УК є ортогональними на всьому тактовому інтервалі  $T$ , а замість терміна “захисний інтервал” використовують термін “коефіцієнт розширення сигналу”, який розраховують із виразу  $\alpha_{ex} = L/N$  і який визначає відносне збільшення тривалості сигналу порівняно з початковою  $\tau_0$ .

Для розглянутих варіантів СП VDSL2 розраховано залежності передавальних характеристик кабелю від інтерференційних завад за методикою, описаною у роботах [4, 5]. Відповідно до цих методик обчислено імпульсні реакції (ІР)  $g(t)$  кабелю “вита пара” типу UTP Cat.5e 4x0.5. Імпульсні реакції, відповідні довжині ліній передачі, показано на рис. 4. Під час розрахунків інтерференції за тривалість ІР приймали кількість відліків ( $R$ ), на яких зосереджено не менше ніж 99,99 % її потужності.

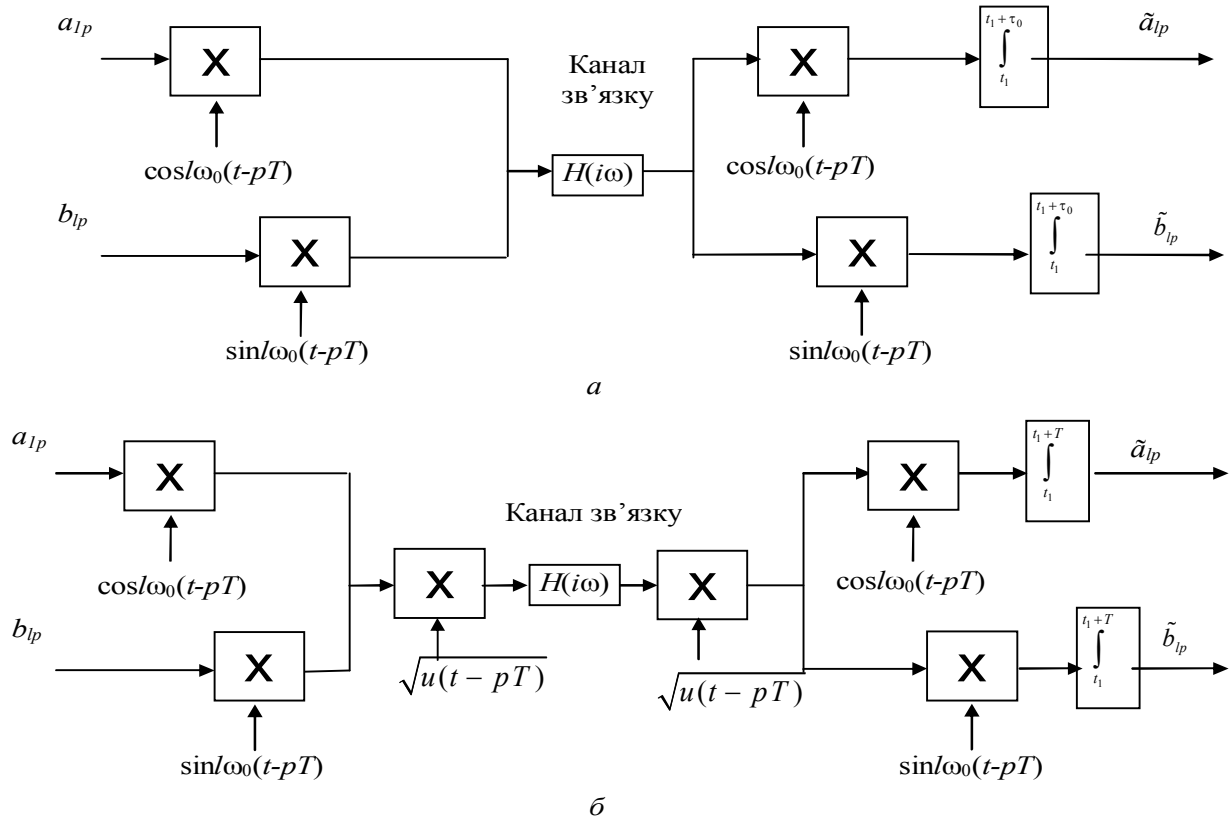


Рис. 2. Структурна схема l-го каналу СП ОГС: з традиційними ОГС (а); з ОГС УК (б)

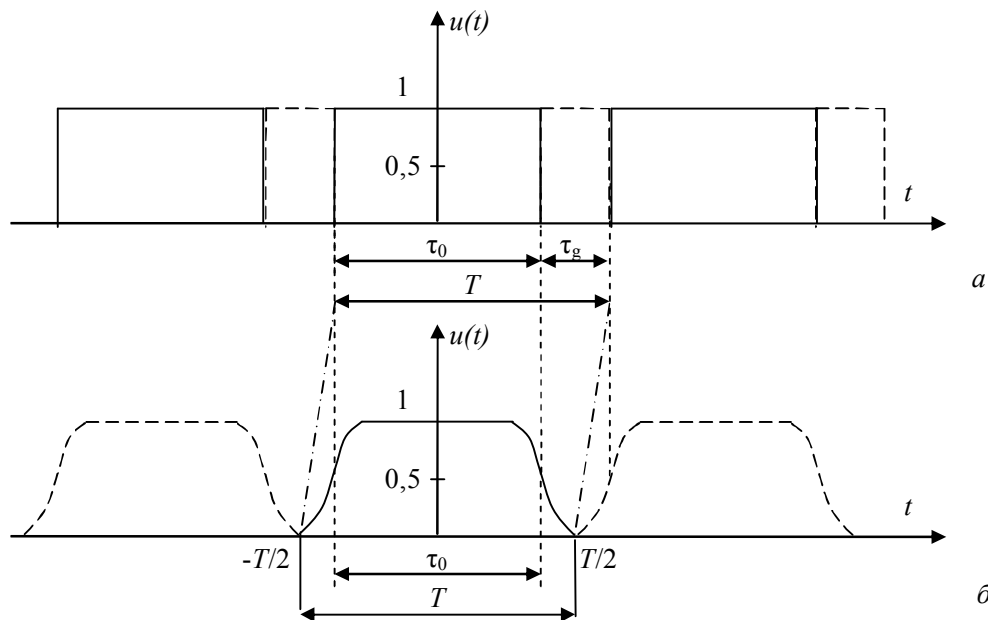


Рис. 3. Вид обвідної лінійного сигналу СП ОГС: з традиційними ОГС (а); з ОГС УК (б)

Залежність від інтерференційних завад оцінювалась у відносних величинах як процентне співвідношення ефективних значень сигнал/шум і подавалась як дискретна функція, аргументом якої є номер каналу (несучої) СП VDSL2 –  $h_l$  %. Формула для розрахунку має такий вигляд:

$$h_l = \sqrt{\frac{\varepsilon_l^2}{s_l^2}} * 100\%, l = 0 \dots N - 1 \tag{1}$$

де  $\varepsilon_l$  – ефективне значення завади;  $s_l$  – ефективне значення сигналу в  $l$  каналі СП на вході приймача.

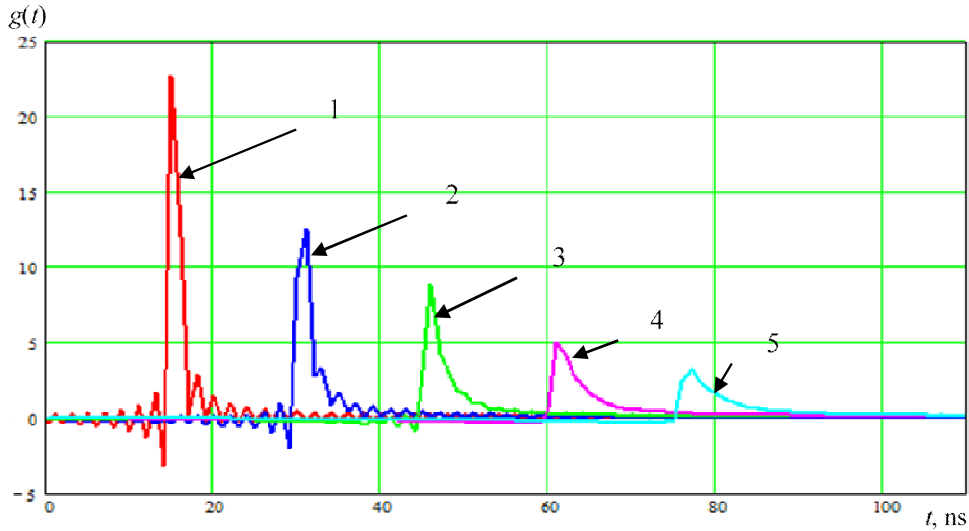


Рис. 4. Імпульсні реакції лінії передачі СП VDSL2, яка працює по кабелю UTP Cat.5e 4x0.5

Надалі відсоткове співвідношення ефективних значень сигнал/шум ( $h_l$ ) називатимемо коротко – інтерференційна завада.

### 3. Результати дослідження інтерференційних завад

На рис. 5 і 6 наведено тривимірні графіки залежності розподілу по каналах ( $l$ ) значень інтерференційної завади ( $h_l$ ) від моменту початку опрацювання сигналу приймачем (інтегрування) ( $k_T$ ) відповідно за довжин лінії  $l_n = 100$  і  $500$  м для традиційних СП ОГС.

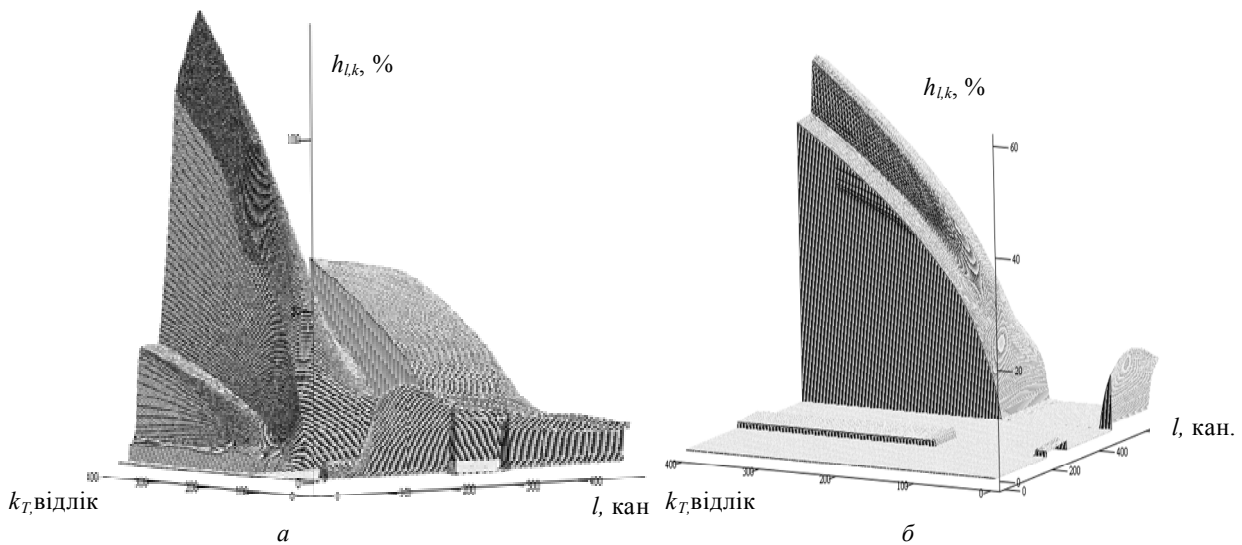


Рис. 5. Графік функції  $h_{l,k}$  для СП VDSL2 з традиційними ОГС:  $L_n = 100$  м; Cat.5e 4x0.5;  $L = 128$ ; напрям передавання: а – DS; б – US

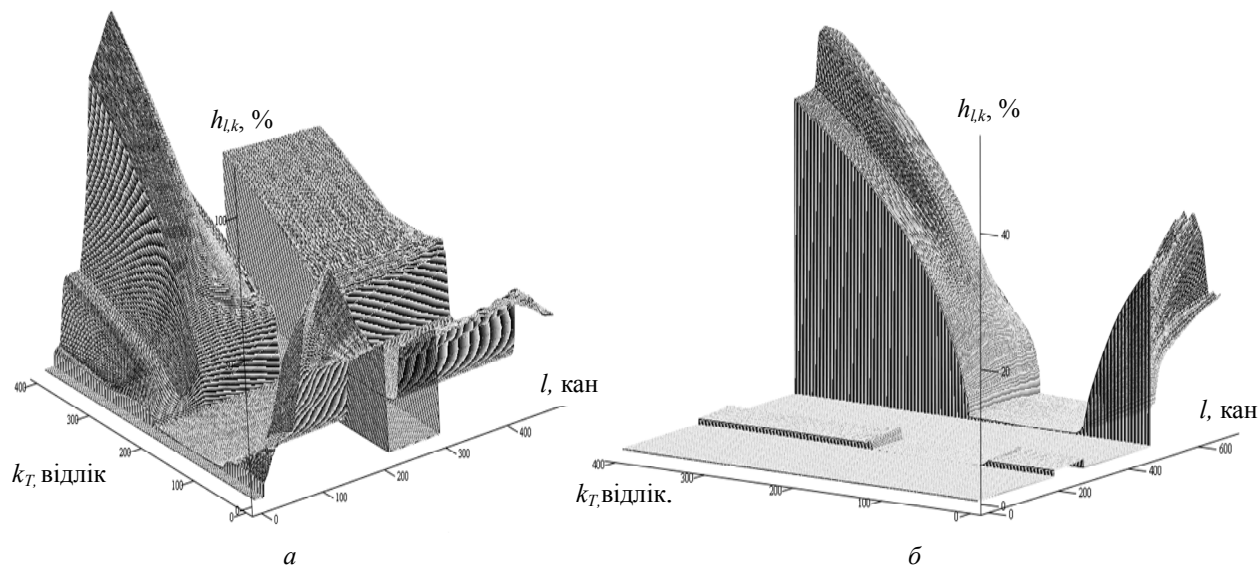


Рис. 6. Графік функції  $h, k$  для СП VDSL2 з традиційними ОГС ( $L_n = 500$  м; Cat.5e 4x0.5;  $L = 128$ ; напрям передавання: а – DS; б – US)

Аналогічні результати для СП з ОГС УК наведено на рис. 7 і 8. На графіках використано такі позначення:  $l$  – номер каналу (несучої);  $k_T$  – номер відліку початку інтегрування (опрацювання сигналу в приймачі);  $h_l, k$  – інтерференційна завада як функція двох змінних: номера каналу і номера відліку початку інтегрування.

Для подальшого аналізу результатів виконано розрахунок інтегральних оцінок інтерференції, який полягає у визначенні середньоарифметичного для всіх інформаційних каналів значення інтерференційної завади  $h_k$  як функції від значення відліку початку інтегрування  $k_T$ . За мінімуму функцій  $h_k$  встановлено оптимальні значення відліку початку інтегрування  $k_{T_{opt}}$  для всіх заданих вихідних даних варіантів (із використанням традиційних ОГС та ОГС ОК, у разі передавання у висхідному і низхідному напрямках, для різних довжин лінії  $l_n$ ).

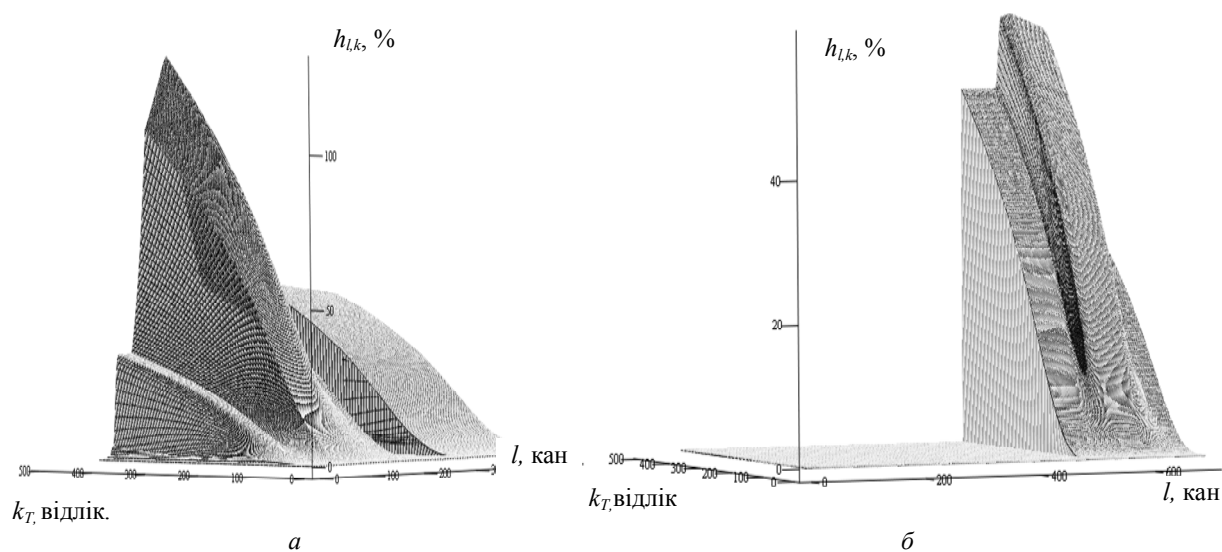


Рис. 7. Графік функції  $h, k$  для СП VDSL2 з ОГС УК ( $L_n = 100$  м; Cat.5e 4x0.5;  $L = 128$ ; напрямок передачі: а – DS; б – US)

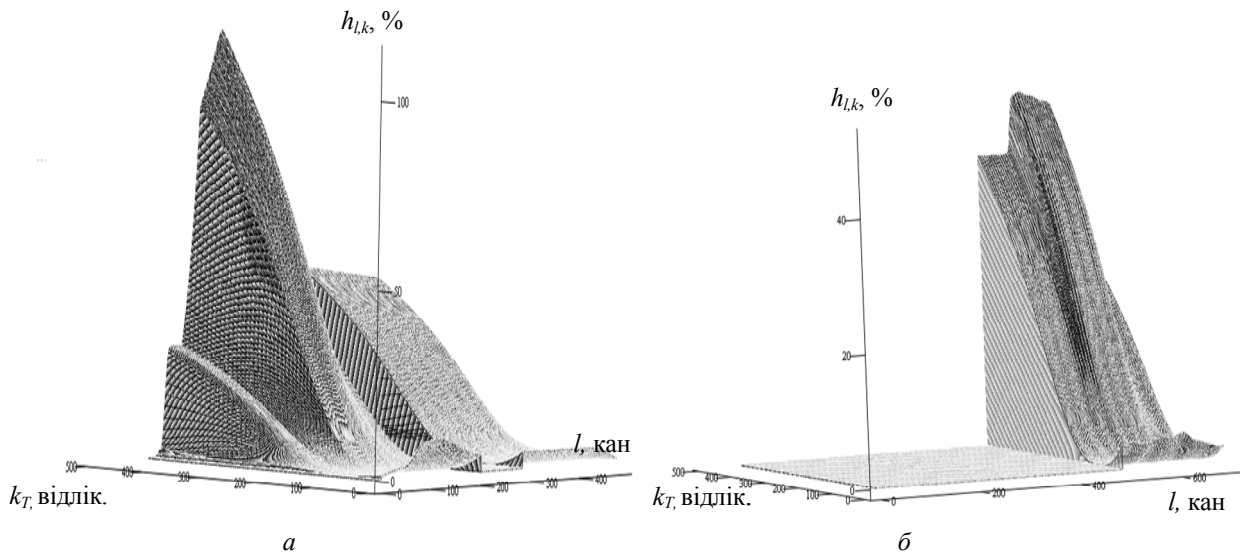


Рис. 8. Графік функції  $h_k$  для СП VDSL2 з ОГС УК ( $L_n = 500$  м; Cat.5e 4x0.5;  $L = 128$ ; напрям передавання: а – DS; б – US)

Результати визначення оптимальних значень  $k_{T_{opt}}$  подано в табл. 1, а відповідні значення середньоарифметичного  $h_k$  за оптимального значення  $k_{T_{opt}}$  – в табл. 2. Відповідні оптимальні значення  $k_{T_{opt}}$  та графіки розподілу інтерференційних завад по каналах СП VDSL2  $h_l$  із використанням традиційних ОГС наведено на рис. 9, аналогічні результати для СП VDSL2 у разі використання ОГС УК – на рис. 10.

Таблиця 1

**Оптимальні значення номера відліку початку інтегрування  $k_{T_{opt}}$**

$l_n$ , м	Традиційні ОГС		ОГС УК	
	US	DS	US	DS
100	110	113	8	14
200	129	128	25	35
300	127	126	48	46
400	128	110	57	59
500	128	129	75	72

Таблиця 2

**Середньоарифметичне значення інтерференційної завади  $h_k$  за оптимального значення номера відліку початку інтегрування  $k_{T_{opt}}$ , %**

$l_n$ , м	Традиційні ОГС		ОГС УК	
	US	DS	US	DS
100	0,01	0,012	0,011	0,013
200	0,025	0,069	0,011	0,037
300	0,043	0,14	0,014	0,073
400	0,081	0,3	0,027	0,115
500	0,154	0,445	0,055	0,17

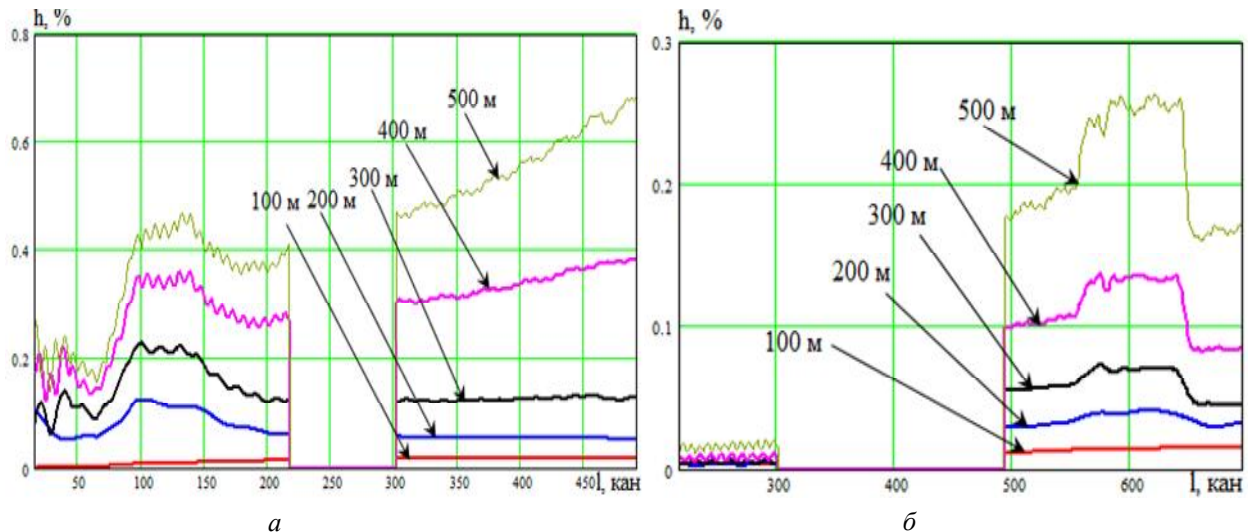


Рис. 9. Графік функцій  $h_i$  за оптимального  $k_T$  для СП VDSL2 з традиційною ОГС (Cat.5e 4x0.5;  $L = 128$ ; напрям передавання: а – DS; б – US)

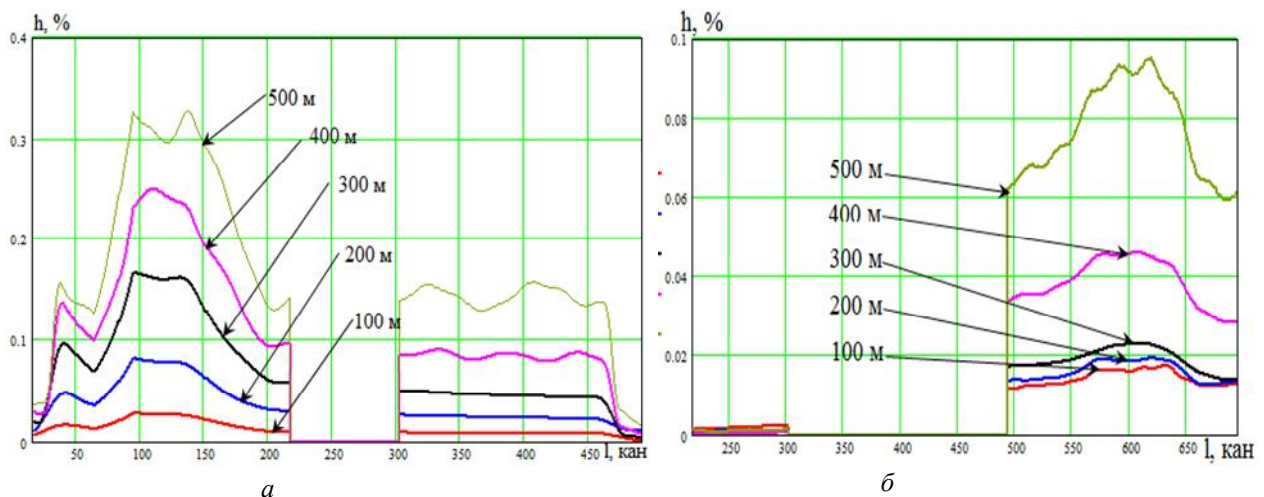


Рис. 10. Графік функцій  $h_i$  за оптимального  $k_T$  для СП VDSL2 з ОГС УК (Cat.5e 4x0.5;  $L = 128$ ; напрямок передачі: а – DS; б – US)

## Висновки

1. У результаті моделювання систем передачі СП VDSL2 отримано оцінки інтерференційних завад залежно від характеристик лінії передавання (кабель “вита пара” категорії Cat.5e 4x0.5) і параметрів СП. Результати моделювання продемонстрували ефективність застосування ОГС УК, якщо довжина лінії перевищує 100 м, порівняно із традиційними ОГС.

2. Дані, наведені в табл. 1 і 2, показують, що оптимальні значення номера відліку початку інтегрування ( $k_{T_{opt}}$ ) і середньоарифметичні значення інтерференційної завади ( $h_k$ ) відрізняються для висхідного і низхідного напрямів передавання. Це пояснюється такими причинами:

- зі зростанням частоти лінійні спотворення збільшуються, відповідно інтерференція у різних каналах (на різних частотах) буде різною й значення  $k_{T_{opt}}$  для різних каналів також буде різним;

- згідно із частотним планом VDSL2 (рис. 1) канали низхідного напрямку (DS) займають смуги частот DS1 = 0,276...3,76 МГц і DS2 = 5,2 ..8,5 МГц, а канали висхідного напрямку (US) – смуги частот US1 = 3,76...5,2 МГц і US2 = 8, ...12 МГц.

3. Величина інтерференційних завад у СП VDSL2 за довжини лінії до 500 м для більшості каналів DS і US не перевищує 1 % із використанням як ОГС ОК, так і традиційних ОГС.

4. Зі збільшенням довжини лінії інтерференція у каналах DS зростає приблизно удвічі на кожні 100 м із використанням як традиційних ОГС, так і ОГС УК.

5. Із результатів, наведених на рис. 9 і 10, видно, що на величину інтерференційних завад істотно впливає кількість сусідніх каналів, що важливіша, ніж смуга частот, в якій ці канали працюють. Канали US1 розташовані вище за частотою, ніж канали DS1, тому лінійні спотворення у смузі частот US1 більші, відповідно інтерференція повинна бути більшою (середня між інтерференцією для каналів DS1 і DS2). Результати дослідження показали, що інтерференція для каналів US1 у 3...10 разів менша, ніж для каналів DS1 із застосуванням традиційних ОГС. У разі використання ОГС УК відмінність ще більша – інтерференція для каналів US1 у 10...25 разів менша, ніж для каналів DS1.

Отже, дослідження дали змогу оцінити величину інтерференційних завад у системах передавання VDSL2 у разі роботи по кабелях типу Cat.5e 4x0.5. Отримані результати надалі заплановано використовувати для оцінювання впливу інтерференційних завад на швидкість передавання VDSL2. Також доведено ефективність застосування як лінійних сигналів-переносників ортогональних гармонійних сигналів узагальненого класу – ОГС УК, які порівняно із традиційними ОГС дають змогу зменшити величину інтерференційних завад у 1,25...3 рази.

### Список використаних джерел

- [1] Балашов В. О., Воробієнко П. П., Лашко А. Г., Ляховецький Л. М. *Мережі та обладнання широко-мугового доступу за технологією DSL: навч. посіб. Одеса, 2009. 225 с.*
- [2] ITU-T. *Recommendation G.993.2 : Veryhighspeed digital subscriber linetransceivers 2 (VDSL2). Appr. 2015, January. Geneva, 2015. 430 p.*
- [3] Балашов В. О., Ляховецький В. О., Орешков В. І. *Характеристики широко-мугового доступу за технологією VDSL2 із застосуванням системи компенсації перехідних завад “векторинг”. Научные труды SWorld. Иваново: Научный мир. 2015. № 3 (40). Том 3. С. 4–11.*
- [4] *Ортогональні гармонійні сигнали узагальненого класу: монографія / [В. О. Балашов, І. Б. Барба, Л. М. Ляховецький, В. І. Орешков]. Одеса: Купрієнко С. В., 2016. 146 с.: 120 рис., 13 табл.*
- [5] Орешков В. И., Езупова Е. П. *Интерференция в системах G.fast при использовании ортогональных гармонических сигналов обобщенного класса // Актуальные научные исследования в современном мире, 2017. № 12(32). Часть 1. С. 136–143.*

## INVESTIGATION OF INTERFERENCE NOISES IN CHANNELS OF TRANSMISSION SYSTEMS BY VDSL2 + TECHNOLOGY

V. Balashov, V. Oreshkov, D. Stelia

*State University of Intelligent Technologies and Telecommunications, 1, Kuznechna Str., Odessa, 65029, Ukraine*

The paper presents the results of the interference noises research in transmission systems (TS) by VDSL2 technology when working on “twisted pair” cables. The research was carried out by analytical modeling of VDSL2-systems with frequency plan B8-6 [998-M2x-B] on UTP Cat.5e 4x0.5 cable using traditional orthogonal harmonic signals (OHS) and generalized class orthogonal harmonic signals of (GC OHS). The



values of interference noise were evaluated in relative values as a percentage of the effective values of interference noise/signal. The paper presents three-dimensional graphs of the dependence of the distribution on the channels of the interference noise values when changing the line length from 100 to 500 meters. The optimal values of the integration start sample by the criterion of the minimum arithmetic mean for all information channels of the interference noise, the dependences of the distribution of interference noise on the channels of VDSL2 TS using traditional OHSs and GC OHSs. The dependence of interference noises in the VDSL2 TS channels depending on the line length, the type of orthogonal harmonic signals and the direction of transmission is analyzed. The efficiency of application of the generalized class orthogonal harmonic signals in comparison with traditional OHSs is proved.

**Key words:** *VDSL2 technology; interference; transmission system; orthogonal signals; twisted pair UTP Cat.5e 4x0.5.*